超疏水和超亲水表面对脉动热管性能的影响

郝婷婷, 马学虎*，兰忠，李楠

（大连理工大学化学工程研究所，大连 116024）

摘　要：本文实验研究了完全超疏水脉动热管和蒸发段为超亲水，冷凝段和绝热段为超疏水的组合表面脉动热管的性能。超疏水表面自由能较低、滞后角小、液滴在表面容易移动。实验发现，与紫铜脉动热管汽液界面呈凹界面不同，超疏水表面汽液界面呈凸界面。组合表面脉动热管汽液界面的长度显著大于完全超疏水脉动热管。与紫铜脉动热管相比，组合脉动热管液弹脉动的振幅增加，而完全超疏水脉动热管蒸发段出现部分烧干，液弹脉动的振幅显著下降。

关键词：脉动热管，超疏水，超亲水，液弹脉动

中图分类号：TK124　　　　**文献标识码：**A

Experimental Investigation of the Effects of Superhydrophobic and Superhydrophilic Surfaces on the Pulsating Heat Pipe

HAO Ting-Ting, MA Xue-Hu, LAN Zhong, LI Nan

(Institute of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Effects of superhydrophobic surface and superhydrophobic and superhydrophilic hybrid surface on the fluid flow of PHPs were investigated. The inner surfaces of the PHPs were hydrophilic surface (copper), hybrid surface (superhydrophilic evaporation and superhydrophobic condensation section), and uniform superhydrophobic surface, respectively. Visualization results showed that the liquid-vapor interface was concave in the copper PHP. On the contrary, the liquid-vapor interface took a convex profile in the PHP with superhydrophobic surface and the liquid-vapor interface length in the hybrid surface PHP was higher than that in the uniform superhydrophobic surface PHP. The partial dryout phenomenon took place in PHPs with uniform superhydrophobic surface and the liquid slug movements became weaker.

Key words: pulsating heat pipe (PHP); superhydrophobic surface; superhydrophilic surface; oscillating motion

0 引言

脉动热管无传统热管的毛细芯结构，由包含蒸发和冷凝的毛细管或多个 U 形槽道组成。蒸发段和冷凝段的温度梯度引起的压差是液弹脉动的驱动力。脉动热管的传热方式主要为液弹脉动的显热传热，是未来高热流密度散热器件的主要途径。表面润湿性能对脉动热管的影响研究较少，Ji 等[1]研究发现超亲水脉动热管的传热性能大于紫铜脉动热管。而与传统毛细芯结构热管不同，超疏水表面脉动热管可以运行，但热阻与亲水脉动热管相比显著增加[2]。Hao 等[3]可视化研究发现超亲水脉动热管的液弹脉动剧烈程度大于紫铜脉动热管，液弹脉动过程中在液弹尾部壁面沉积一层液膜，脉动热管传热性能提高。Fumoto 等[4]研究自润湿性流体脉动热管的传热性能，由于自润湿性流体增加了脉动热管蒸发段的传热性能，脉动热管传热性能提高，热阻降低。

超疏水表面滞后角较小，液滴在超疏水表面容易运动。Rothstein[5]发现在层流和湍流流动过程中超疏水表面能降低流动曳力。对微通道内层流流动压降的研究发现，超疏水微通道压降降低了 40%[6]。Aljallis 等[7]测量了高 Re 数边界层流动的壁面摩擦力。结果显示超疏水表面能够显著降低曳力。Khandekar 等[8]研究发现脉动热管应选择滞后角小的表面，以此来降低液弹运动过程中的毛细阻力。曲伟等[9]研究发现接触角滞后对液弹运动是不利的，可以通过改变毛细管材料、工作介质和充液率等方法来消除毛细滞后的影响。Liu 等[10]发现超亲水表面气泡容易核化，产生的气泡增多。在池沸腾

国家自然科学基金 (No. 51236002)，高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20120041110018)

实验研究中，Chen 等[11]发现在具有纳米线结构的超亲水表面传热系数和临界热通量提高了 100%。Phan 等[12]实验研究发现接触角小于 30 ° 时，接触角为 0 ° 的超亲水表面的核状沸腾的传热系数最高。

表面润湿性能对流体流动及蒸发和冷凝的影响较大，目前表面润湿性能对脉动热管的研究均为单一润湿表面。本文对脉动热管表面进行部分超疏水和超亲水处理，观测液弹局部三相线的演化，结合液弹脉动规律及传热性能，分析超疏水脉动热管和超疏水超亲水组合脉动热管的运行机理。

1 实验系统及表面制备

1.1 实验系统

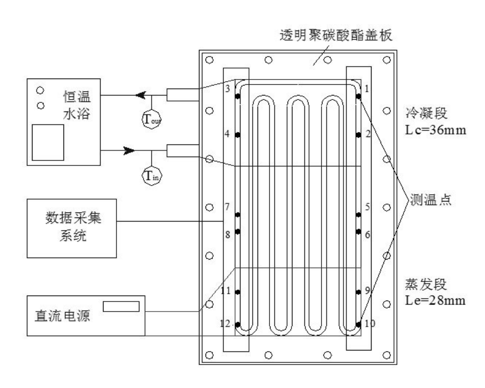


图 1 实验流程示意图

Fig.1 Schematic of the experimental setup

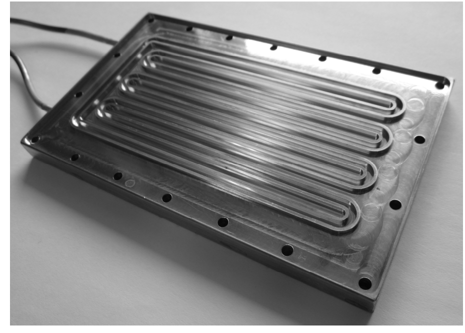


图 2 脉动热管实物图片

Fig.2 Photo of the PHP.

实验装置由紫铜板脉动热管，加热系统，冷却水循环系统，数据采集系统及高速摄像组成，如图 1 所示。在紫铜板（130×80×10mm^3）上机械加工横截面为正方形通道，横截面尺寸为 2×2mm^2。图 2 为板式脉动热管的实物图片。紫铜板与透明聚碳酸酯（PC）盖板通过螺栓拧紧，中间用硅胶垫对脉动热管进行密封。通过直流电源改变脉动热管的加热功率，伏安法测得脉动热管的输入功率。通过冷却水进出口温度及流量计算脉动热管的输出功率。脉动热管通过在紫铜板机械加工制成，弯管数为 4，横截面尺寸为 2×2 mm^2，加热段，绝热段和冷凝段的长度分别为 28 mm，42 mm 和 36 mm，在脉动热管的两个侧边分别开有 6 个直径为 1.5 mm 的热电偶孔，热电偶的测温点与脉动热管通道壁面的垂直距离为 2mm。另外两支热电偶布置在冷却水的进口和出口位置，测量冷却水的进口和出口温度。脉动热管的总传热长度为 106 mm，其中冷凝段、绝热段和蒸发段的长度分别为 36、42 和 28 mm，脉动热管加热段、绝热段和冷却段的测温点数量均为 4 个。通过高速摄像记录液弹脉动的图片，当脉动热管稳态运行时，高速摄像的采集频率为 100 fps，像素为 1024×1024，实际尺寸为 40×40 mm^2，图片分辨率为 0.04 mm/像素，图像处理过程中液弹脉动的振幅的误差为±0.04 mm。

1.2 表面制备

紫铜板脉动热管通过稀硫酸和清洗剂对表面进行清洗，去除表面的氧化物和油污，紫铜表面的接触角为 73.4 °。超亲水的制备方法为紫铜板在 2.5mol/L 氢氧化钾（KOH）和 0.065 mol/L 过硫酸钾（$K_2S_2O_8$）的刻蚀液中刻蚀 30 min，刻蚀温度为 70 ℃。在铜板表面形成一层 CuO 涂层，通过去离子水进行冲洗，在烘箱中 180 ℃加热 30 min。液滴在超亲水表面迅速铺展，接触角约为 0 °。超疏水表面的制备方法[13]为采用过硫酸钾氧化化学腐蚀法在紫铜板上构筑微米纳米多重粗糙结构，结合十八烷基硫醇自组装技术制备紫铜基超疏水表面。即形成 CuO 涂层的超亲水表面在 0.0025 mol/L 的十八烷基硫醇溶液中浸泡 30min 中，浸泡温度为 70 ℃，用乙醇对表面进行清洗，烘干测得超疏水表面的接触角为 155.5 °。三种表面的静态接触角图片和扫描电镜图片如图 3 和图 4 所示。超亲水和超疏水表面形成微米级氧化铜（CuO）簇状结构。

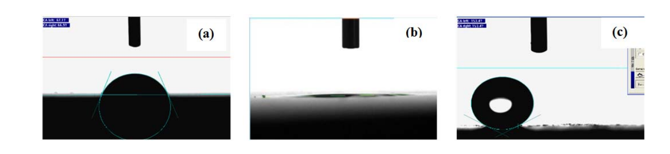


图 3 表面静态接触角图片

Fig. 3 Contact angles on (a) copper, (b) superhydrophilic and (c) superhydrophobic surfaces.

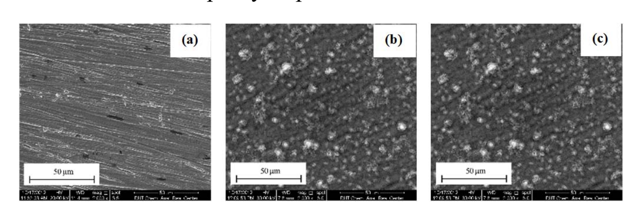


图 4 环境扫描电镜图片

Fig. 4 ESEM images of (a) copper, (b) superhydrophilic and (c) superhydrophobic surfaces.

2 实验结果与讨论

脉动热管运行时蒸发段的流型如图 5 所示（加热功率 60 W）。紫铜脉动热管和组合表面脉动热管蒸发段产生小气泡，小气泡迅速膨胀，推动相邻的液弹向脉动热管的冷凝段移动。由于重力的作用，液弹回流到蒸发段，压缩蒸发段的汽弹。汽弹的膨胀和压缩过程往复进行，脉动热管液弹脉动。而超疏水脉动热管启动阶段没有汽弹的膨胀过程蒸发段部分烧干，且液体发生核状沸腾的现象。

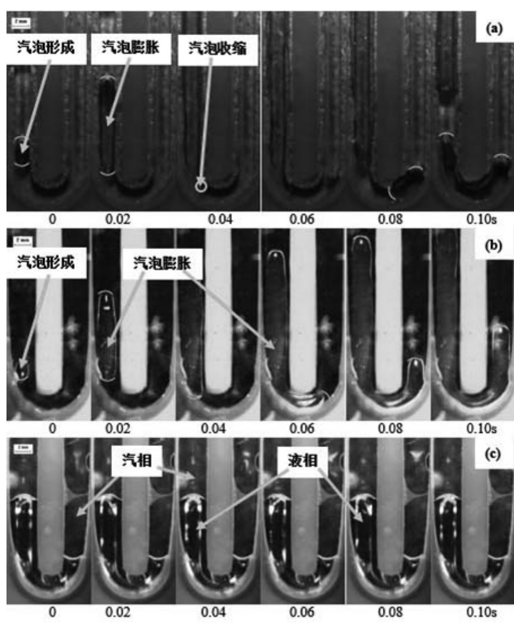


图 5 脉动热管启动阶段蒸发段流型

Fig. 5 Flow patterns in the evaporation section of PHPs (a) copper, (b) superhydrophilic and (c) superhydrophobic surface.

加热功率为 90 W 时液弹脉动的位置及汽液界面长度随时间的变化，如图 6 所示，图 7 为对应的可视化图片。从图 6 可以看出，紫铜，组合表面和超疏水脉动热管液弹脉动的平均振幅分别为 5.86，8.35 和 3.24 mm，最大振幅分别为 12.97，18.12 和 7.34 mm。其余的加热功率下液弹脉动的规律相同，加热功率为 105 W 时，紫铜，组合表面和超疏水脉动热管液弹脉动的平均振幅分别为 7.03，7.21 和 7.22 mm，最大振幅分别为 15.75，17.08 和 14.33 mm。与紫铜脉动热管相比，蒸发段为超亲水，绝热段和冷凝段为超疏水的脉动热管的传热性能大于普通紫铜脉动热管。原因是由于绝热段和冷凝段为超疏水表面，滞后角仅为 2 °，液弹脉动过程的阻力降低，液弹容易在超疏水表面移动[5, 7]，且蒸发段为超亲水表面，汽相和壁面之间存在一层液膜，膜状蒸发的传热系数显著升高[14]。从图 7 可以看出，紫铜脉动热管液弹脉动热管中汽液界面呈凹液面，而组合表面脉动热管和完全超疏水脉动热管汽液界面呈凸界面。紫铜、组合表面和超疏水脉动热管汽液界面长度的最大值分别为 16.76、25.91 和 16.38 mm。组合表面脉动热管汽液界面长度显著大于完全超疏水脉动热管。

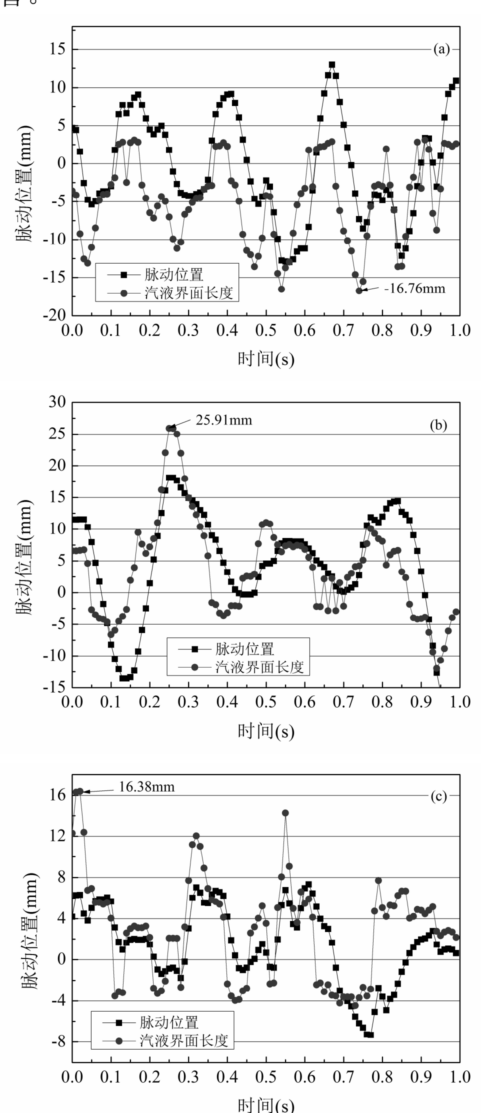
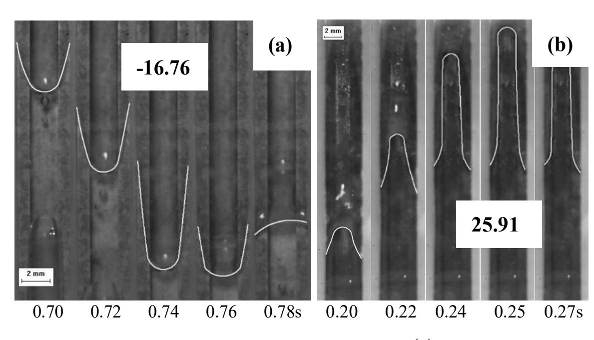


图 6 脉动热管液弹脉动位置和汽界面长度随时间的变化

Fig. 6 Liquid slug position and liquid-vapor interface length of the PHPs (a) copper (b) hybrid surface and (c) superhydrophobic PHP (heat input: 90 W)



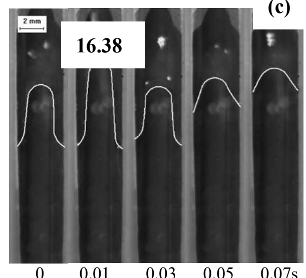


图 7 脉动热管液弹脉动及汽液界面变化可视化图片

Fig. 7 Photography of flow patterns of the PHPs (a) copper (b) hybrid surface (c) superhydrophobic PHP (heat input: 90 W).

3 结论

实验研究了三种不同润湿性表面脉动热管稳态运行时液弹的汽液界面形状和液弹脉动情况。结论如下：

(1)完全超疏水脉动热管启动阶段蒸发段没有汽弹的膨胀和压缩现象，蒸发段发生核状沸腾，液体不能完全润湿蒸发段，蒸发段出现干点。紫铜表面，汽液界面呈凹液面形状，而超疏水表面，汽液界面呈凸液面形状。

（2）组合表面脉动热管液弹脉动的振幅大于紫铜脉动热管，而完全超疏水脉动热管，蒸发段存在干点液弹脉动的振幅显著下降。

参考文献

[1] Ji Y, Xu C, Ma H, et al. An experimental investigation of the heat transfer performance of an oscillating heat pipe with copper oxide (CuO) microstructure layer on the inner surface [J]. Journal of Heat Transfer, 2013, 135: 074504.

[2] Ji Y, Chen H-h, Kim Y J, et al. Hydrophobic Surface Effect on Heat Transfer Performance in an Oscillating Heat Pipe [J]. Journal of Heat Transfer, 2012, 134: 074502.

[3] Hao T, Ma X, Lan Z, et al. Effects of hydrophilic surface on heat transfer performance and oscillating motion for an oscillating heat pipe [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 72: 50-65.

[4] Fumoto K, Kawaji M, Kawanami T. Study on a Pulsating Heat Pipe With Self-Rewetting Fluid [J]. Journal of Electronic Packaging, 2010, 132: 031005.

[5] Rothstein J P. Slip on Superhydrophobic Surfaces [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2010, 42: 89-109.

[6] Ou J, Perot B, Rothstein J P. Laminar Drag Reduction in Microchannels Using Ultrahydrophobic Surfaces [J]. Physics of fluids, 2004, 16: 4635-4643.

[7] Aljallis E, Sarshar M A, Datla R, et al. Experimental Study of Skin Friction Drag Reduction on Superhydrophobic Flat Plates In High Reynolds Number Boundary Layer Flow [J]. Physics of fluids, 2013, 25(2): 025103.

[8] Khandekar S, Schneider M, Schäfer P, et al. Thermofluid Dynamic Study of Flat-Plate Closed-Loop Pulsating Heat Pipes [J]. Microscale Thermophysical Engineering, 2002, 6: 303-317.

[9] 曲伟，范春利，马同泽. 脉动热管的接触角滞后和毛细滞后阻力[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(2): 301-303.
QU Wei, FAN Chunli, MA Tongze. Contact Angle Hysteresis and Capillary Resistance of Pulsating Heat Pipe [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(2): 301-303.

[10] Liu T Y, Li P, Liu C, et al. Boiling Flow Characteristics in Microchannels with Very Hydrophobic Surface to Super-Hydrophilic Surface [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54: 126-134.

[11] Chen R, Lu M-C, Srinivasan V, et al. Nanowires for Enhanced Boiling Heat Transfer [J]. Nano Letters, 2009, 9(2)): 548-553.

[12] Phan H T, Caney N, Marty P, et al. How Does Surface Wettability Influence Nucleate Boiling [J]. Comptes Rendus Mecanique, 2009, 337: 251-259.

[13] 钱柏太，沈自求. 控制表面氧化法制备超疏水 CuO 纳米花膜[J]. 无机材料学报, 2006, 21: 747-752.
QIAN Botai, SHEN Ziqiu. Superhydrophobic CuO Nanoflowers by Controlled Surface Oxidation on Copper [J]. Journal of Inorganic Materials, 2006, 21(3): 747-752.

[14] Ma H B, Cheng P, Borgmeyer B, et al. Fluid flow And Heat Transfer in The Evaporating Thin Film Region [J]. Microfluid Nanofluid, 2008, 4: 237-243.